第30卷 第8期 材 料 研 究 学 报 Vol. 30 No. 8
2016 年 8 月 CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH August 2016

Ni-Cr-Co-Mo-W-Ta-Al合金在900℃和1000℃的高温氧化行为*

卢旭东 王复利

(沈阳理工大学装备工程学院 沈阳 110159)

摘 要 采用X射线衍射(XRD), 扫描电镜(SEM)及能谱(EDAX)等方法, 研究了Ni-4.66Cr-5.87Co-7.54Mo-2.90W-4.97Ta-6.32Al合金在900℃和1000℃的高温氧化行为。结果表明, 合金氧化动力学曲线遵循氧化初期氧化增重速率较快, 氧化期间氧化动力学曲线呈波浪式变化, 且呈现氧化温度越高波浪式越明显的特征; 氧化300 h后合金表面氧化物膜分为2层, 外层氧化物为NiO、$Ni_2Cr_2O_4$、Ni_2CoO_4和$CoTa_2O_6$, 分布在外层的$CoTa_2O_6$抑制基体中元素Al向外扩散, 形成内层氧化物Al_2O_3。在氧化期间, 合金内部生成了内氮化物AlN, 且在合金内部AlN与Al_2O_3成规律性分布, 与外氧化膜相邻的为元素Al的内氧化物Al_2O_3区域, 远离外氧化膜的基体内部为元素Al的内氮化物AlN区域, 随氧化温度升高, 内氧化区和内氮化区的深度增加, 内氧化物和内氮化物的尺寸增大。

关键词 金属材料, 镍基合金, 恒温氧化, 动力学曲线, 内氧化, 内氮化

分类号 TG132 文章编号 1005-3093(2016)08-0589-06

Isothermal Oxidation Behaviour of Ni-Cr-Co-Mo-W-Ta-Al Superalloy at 900℃ and 1000℃

LU Xudong** WANG Fuli

(Department of Weapon Launching Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

*Supported by Financial Support by the Education Department of Liaoning Province No. L2012063 and Research Fund for the Doctoral Program of Liaoning Province No. 20141088.

Manuscript received March 28, 2016; in received form May 18, 2016.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (024)24682755, E-mai: lxd_8181@163.com

ABSTRACT The oxidation behavior of a superalloy Ni-4.66Cr-5.87Co-7.54Mo-2.90W-4.97-Ta-6.32Al at 900℃ and 1000℃ in air has been investigated by means of TGA, XRD and SEM/EDAX. Results show that the oxidation rate in the initial stage is rapid, then with the oxidation time the oxidation weight gain tends to be smooth, but the oxidation kinetics curve for the superalloy later presents a wavy-like change and much obviously for the higher oxidation temperature. The oxide scales consist of two layers both at 900℃ and 1000℃. Of which , the outer layer is mainly composed of NiO、$Ni_2Cr_2O_4$、Ni_2CoO_4 and $CoTa_2O_6$, while the inner layer is a thin scale of Al_2O_3. The continuous oxide layer of Al_2O_3 is formed on the alloy surface to restrain the growth of oxide scale and decrease the oxidation rate. The precipitates of internal oxide (Al_2O_3) and internal nitride (AlN) formed in the superalloy after exposure for 300h at 900℃ and 1000℃; the internal oxidation zone forms on the surface of the superalloy just beneath the outer layer of the oxide scale, while the internal nitridation zone forms below the internal oxidation zone; with the increasing temperature the internal oxidation zone and internal nitridation zone became thicker, simultaneity the size of internal nitride and internal oxide increases.

KEY WORDS metallic materials, Ni-base superalloy, isothermal oxidation, kinetics curves, internal oxidation, internal nitridation

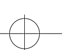
由于镍基合金具有优良的高温力学性能和组织稳定性, 已广泛用于制造燃油发动机涡轮叶片等热端部件, 镍基合金优异的承温能力可以提高发动机的容量和热效率, 提升发动机的性能[1, 2]。发动机中热端部件的工作环境苛刻, 目前发动机通常的工作温度高达900℃[3], 长期处于高温苛刻环境中, 因此

* 辽宁省教育厅资金资助L2012063, 辽宁省省博士科研基金资助20141088。

2016年3月28日收到初稿; 2016年5月18日收到修改稿。

本文联系人: 卢旭东

DOI: 10.11901/1005.3093.2016.163



为提高镍基合金承温性能、增强其抗氧化能力，需要在合金表面施加防护涂层或对合金进行预氧化处理，这些措施虽然可以提高镍基合金的抗氧化性能，但合金基体的抗高温氧化性能也是合金及高温防护涂层体系能否正常应用的一项重要考核指标。镍基合金的承温能力与合金的成分密切相关，合金的抗氧化能力及氧化行为随合金成分的不同而千差万别，因此有必要研究不同成分镍基合金的高温氧化行为。以往的研究表明，适当的添加合金元素Al、Cr，镍基高温合金高温氧化时可以在合金形成致密的Al_2O_3或Cr_2O_3氧化膜，合金的高温抗氧化性能提高[4]；K35合金在850℃～1000℃氧化期间，合金中元素Ti在合金表面生成了疏松的TiO_2促进了合金的氧化[5]；合金中添加B和Si元素时，高温时B和Si元素易形成低熔点的包含B_2O_3与SiO_2硼硅酸盐玻璃相，覆盖在试样表面，阻碍了O向材料内部的扩散，可以提高材料的抗氧化性能[6]；同时有研究表明合金中添加Ta元素会提高合金的抗氧化能力[7]。

据此，本文设计了Ni-Cr-Co-Mo-W-Ta-Al镍基合金，并研究该合金在900℃和1000℃的高温氧化特征及合金元素在氧化物膜中的分布规律，试图为耐热镍基合金开发及应用提供理论依据。

1 实验方法

采用真空熔炼技术制备柱状镍基合金，成分如下：Ni-4.66Cr-5.87Co-7.54Mo-2.90W-4.97Ta-6.32Al(质量分数)。将制备好的柱状合金利用线切割技术切割成片状试样，尺寸为10 mm×10 mm×2 mm，并经2000 #水磨砂纸机械研磨，丙酮和蒸馏水超声波清洗。

将合金试样放入煅烧至恒重的瓷舟中，使合金试样与瓷舟壁保持点(线)接触，避免煅烧期间氧化膜剥落，将盛放合金试样的瓷舟放入自制的管式炉中，分别在900℃和1000℃保温不同时间取出空冷，将试样(不计瓷舟重量)在感量为0.1 mg的FA2104A电子天平中称重，并绘制氧化动力学曲线。

使用日本理学D/max-RB型X射线衍射仪及S-3400N型扫描电镜(SEM/EDAX)对试样表面氧化产物进行物相分析和形貌观察。

2 实验结果

2.1 氧化动力学曲线

合金在900℃和1000℃高温氧化300 h后的氧化动力学曲线如图1所示。

由图1可以看出，合金在900℃和1000℃高温氧化300 h期间，氧化初期合金氧化增重速度较快，随氧化时间延长合金氧化增重速率下降。由于氧化期间试样需要从电炉中频繁取出称重，冷热交替频繁，导致合金表面氧化皮剥落，氧化动力学曲线呈现波浪式波动，但氧化动力学曲线总体呈增重趋势，其中经900℃和1000℃高温氧化300 h后单位面积增重分别为1.3和1.7 mg/cm²。

2.2 氧化产物的XRD分析

合金经900℃和1000℃氧化300 h后，表面氧化物膜的XRD分析结果如图2所示。

由图2可知，合金经900℃氧化300 h后合金表面的氧化膜主要由NiO、Al_2O_3、$NiCo_2O_4$和$NiCr_2O_4$尖晶石相组成。合金经1000℃氧化300 h的表面氧化膜相组成与900℃氧化相比，增加了$CoTa_2O_6$和$CoCr_2O_4$尖晶石相，无$NiCo_2O_4$相。

经900℃和1000℃氧化，虽然在氧化期间合金

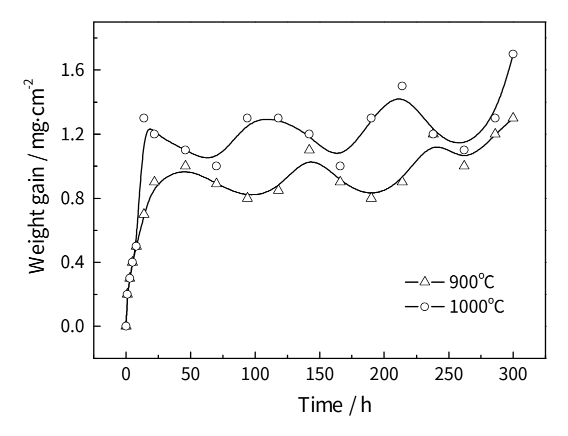


图1 合金分别在900℃和1000℃氧化300 h的氧化增重动力学曲线

Fig.1 Oxidation kinetics of superalloy oxidized for 300 h at 900℃ and 1000℃ in air

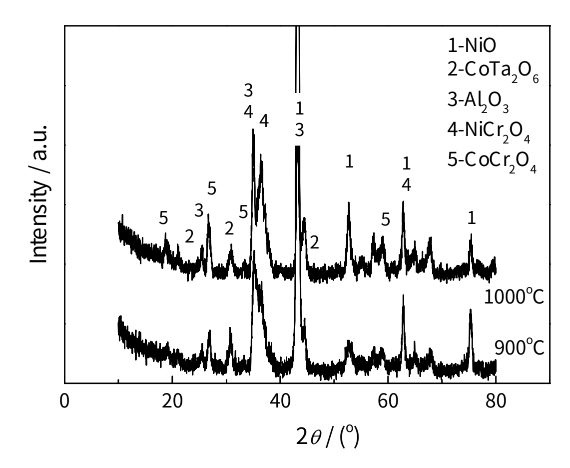


图2 合金在900℃和1000℃下氧化300 h后的表面XRD分析

Fig.2 XRD analysis of Ni-base superalloy oxidized for 300 h at 900℃ and 1000℃

表面发生氧化物膜局部开裂甚至剥落, 仅是局部、微量氧化物剥落, XRD图谱能够反馈出氧化不同时间氧化物的生成。但氧化期间合金表面氧化产物中均无Mo和W的氧化物, 分析原因可能是合金中形成的MoO_3和WO_3氧化物发生了挥发, 使氧化膜表面贫Mo和W。

2.3 氧化产物形貌及成分分析

合金经900℃和1000℃氧化300 h后, 合金表面氧化物膜形貌, 如图3所示。

由图3可以看出, 合金经900℃氧化300 h后表面生成大量颜色发白的颗粒状氧化物, 经EDAX分析富含Al、Ni、Cr和O元素, 局部颗粒状氧化物相连成宽度约为1 μm的条状。颗粒状氧化物间生成了暗色氧化物, 经EDAX分析富含Al、Ni、Cr、Co和O元素。合金经1000℃氧化300 h后合金表面生成颜色发黑的宽度约为2～3 μm的条状氧化物, 经EDAX分析富含Al、Ni和O元素, 条状氧化物间生成了棱角分明的颗粒状氧化物, 如图3b中箭头所示, 经EDAX分析富含Al、Ni、Cr、Co和O元素。

2.4 氧化产物横截面形貌及成分分布

合金经900℃和1000℃氧化300 h后, 氧化物膜横截面形貌, 如图4所示; 合金经1000℃氧化300 h后氧化物膜中的元素分布如图5所示。

由图4 a可以看出, 合金经900℃氧化300 h后, 合金表面生成了氧化物膜, 合金内部生成了形状不规则的内氧化产物。合金的氧化产物由外及内, 分为2层; 外层氧化物标注为层1, 厚度约为2～3 μm左右, 外层结构致密、平滑无明显空隙。内层氧化物颜色发黑, 且部分氧化物向合金基体方向生长, 厚度约为3 μm, 标注为层2。内氧化层与外氧化层间分界明显且平滑、颜色发白, 如图4a中箭头所示。

由图4b可以看出, 1000℃氧化300 h后合金表面的氧化膜分为2层, 外氧化物层标注为层1, 厚度约为6 μm左右, 外氧化物层可明显分为上下两层, 上层结构疏松且有大量孔洞, 富含O、Cr、Co和Ni元素, 如图5g、e、d和i所示, 结合XRD分析, 认为上层氧化物为$NiCr_2O_4$、$CoCr_2O_4$和NiO的复合氧化

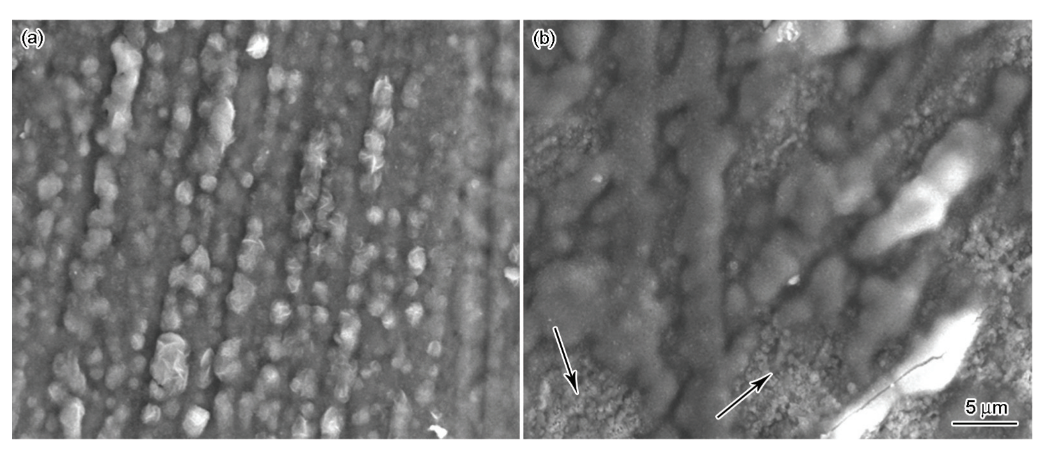


图3 合金在不同温度氧化300 h后的表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of Ni-base superalloy oxidized for 300 h at (a) 900℃ and (b) 1000℃

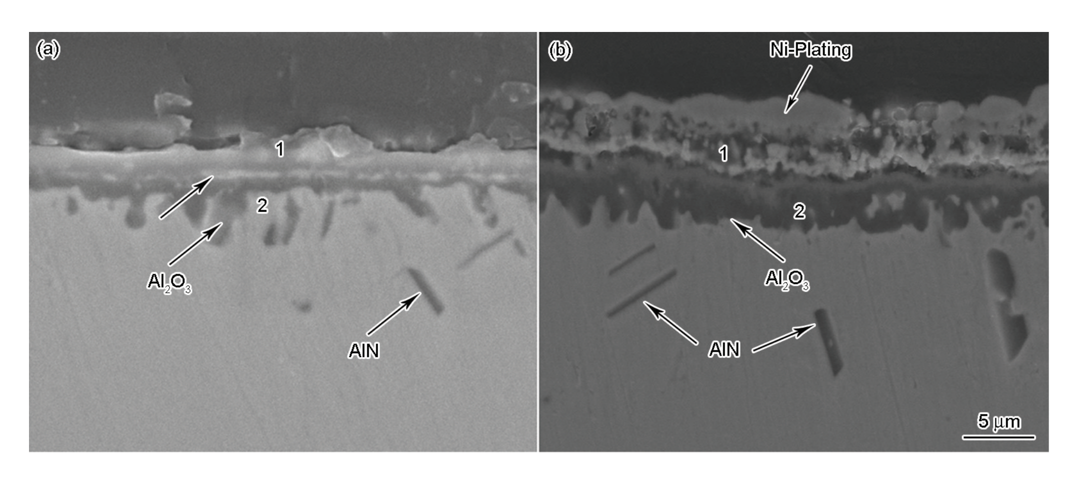


图4 合金在不同温度氧化300 h后的横截面形貌

Fig.4 Cross sectional morphologies of Ni-based superalloy after oxidation for 300 h at (a) 900℃ and (b) 1000℃

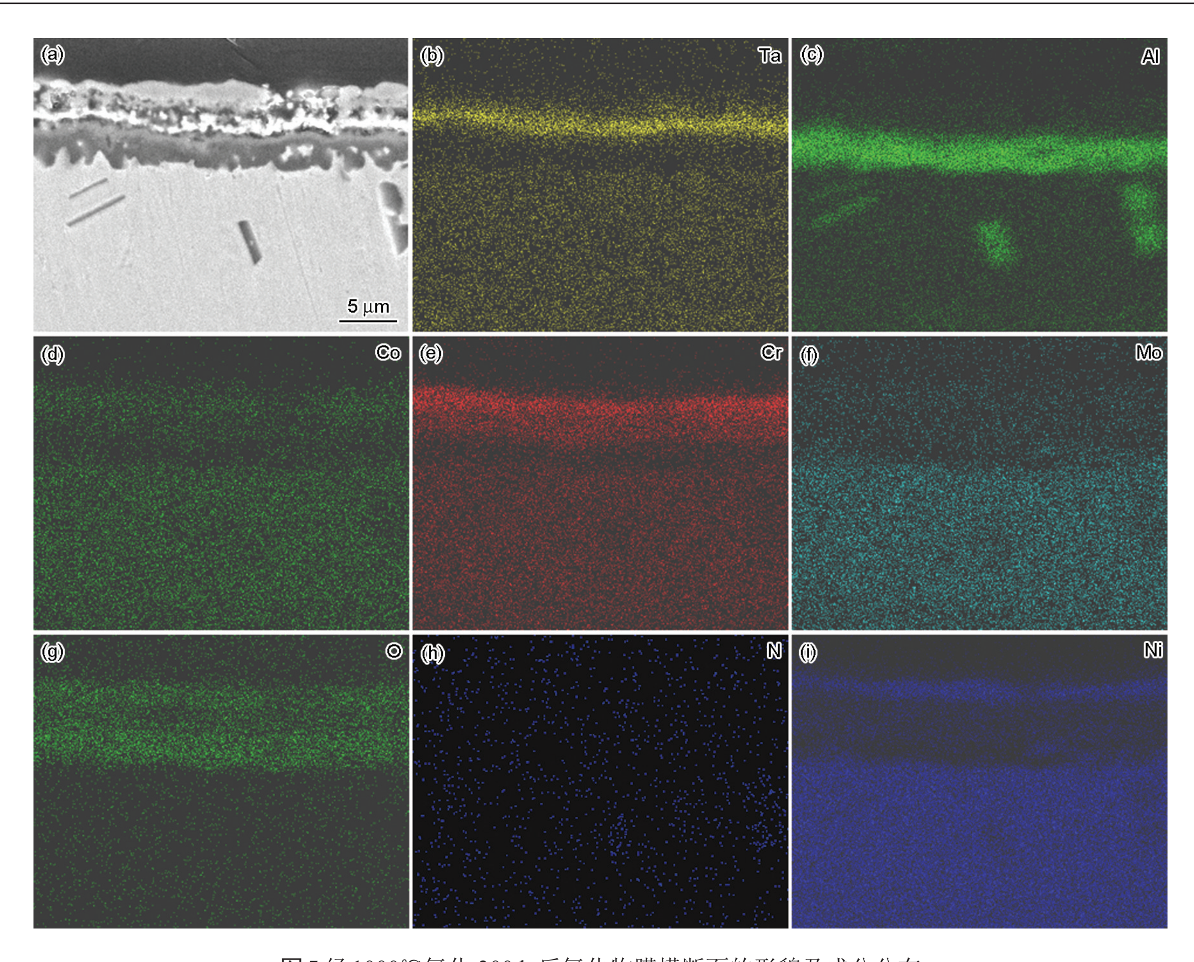


图5 经1000℃氧化 300 h 后氧化物膜横断面的形貌及成分分布

Fig.5 Cross sectional morphology (a) and (b～i) content distributions of the specimen after oxidation at 1000℃ for 300 h

物层; 下层氧化物结构相对致密且颜色发白, 连续分布在合金的次表层, 富含O、Ta、Co元素, 如图5g、b和d所示, 结合XRD分析结果下层白色氧化物主要为$CoTa_2O_6$。外层氧化物层下方为内层氧化物, 标注为层2, 厚度约为5 μm, 内层氧化物结构致密, 紧密结合在合金基体表面, 局部内氧化物呈钉状嵌入合金内部, 富含O和Al元素, 如图5g和c所示, 为Al_2O_3。合金内部内氧化区的长条状和针状物, 富含Al和N元素, 如图5c和h所示, 经分析为Al的氮化物, 即AlN; 经比对1000℃时AlN的尺寸明显大于900℃时的。

3 讨论

3.1 合金外氧化物膜形成分析

以往的研究表明, Ni-Cr-Al三元合金中添加Co、Mo、W、Ta元素后合金的高温氧化行为变得更为复杂[8,9], 合金高温氧化行为受动力学因素和热力学因素共同影响[10]。根据《无机物热力学手册》[11]中相关数据计算, 所研究合金发生氧化时, 合金中元素生成产物的摩尔生成吉布斯自由能, 列于表1, 可见合金中Ta、Al和Cr发生氧化生成Ta_2O_5、Cr_2O_3、Al_2O_3的摩尔生成吉布斯自由能低于合金中其它元素。热力学理论认为合金中元素发生氧化反应生成氧化物的活性, 与氧化物的生成吉布斯自由能大小有关, 相同温度下生成吉布斯自由能数值越负, 表明该元素与氧的亲和力越强[12]。因此900℃和1000℃时合金中元素Ta、Al和Cr与O_2的亲和力优于其它元素。但合金中元素氧化除受热力学因素影响外还受动力学因

表1 相关化合物的吉布斯自由能

Table 1 Gibbs free energy for the formation of related compounds ($kJ \cdot mol^{-1}$)

Compound	900℃	1000℃
Al_2O_3	-1296	-1263
Cr_2O_3	-814	-789
NiO	-134	-126
CoO	-153	-145
Ta_2O_5	-1541	-1500
AlN	-189	-177
CrN	-27	-20
TaN	-152	-144

素影响, 氧化初期合金中元素Ta优先发生氧化反应生成Ta_2O_5, 导致合金表面元素Ta被消耗, 同时元素Ta在Ni中迁移速率较小, 合金内部元素Ta无法补充到合金表面, 导致元素Ta的含量相对下降。此时, 合金表面的元素Cr、Al含量相对上升, 因此氧化初期在合金表面发生元素Al和Cr的选择性氧化, 但由于Al和Cr的含量均未达到在合金表面生成单一氧化物Cr_2O_3或Al_2O_3的临界值[13]。此时合金表面形成含Ta_2O_5、Al_2O_3和Cr_2O_3的混合氧化物膜, 导致合金氧化动力学曲线初期增重较快, 混合氧化物膜既阻碍了空气中O_2向合金表面扩散, 也阻碍了合金中元素向合金表面扩散, 延缓了合金的氧化, 对合金起保护作用。随氧化时间延长, 合金表面元素Ta、Al和Cr不断被消耗, 合金基体内的元素Ta、Al和Cr在浓度梯度的驱动下向氧化反应区扩散, 导致Al_2O_3和Cr_2O_3混合氧化物膜的下方形成元素Ta、Al和Cr的贫乏区, 如图5b、c和e所示。

随氧化时间延长, 合金表面混合氧化物膜厚度增加, 氧化膜下方合金基体内部元素Ta、Al和Cr被进一步消耗含量下降, 合金中其它元素含量相对上升。同时由于氧化物膜厚度增加, 氧化物的膨胀系数各不相同, 氧化物膜受应力作用产生裂痕、直至破裂剥落[14], 尤其是Al_2O_3由于脆性大更容易开裂剥落, 但元素Ta在Ni中的迁移速率较元素Cr、Al在Ni中的迁移速率慢, 这使得混合氧化物膜剥落区域中Ta的相对含量上升明显, 此区域Ta及其他元素与通过裂纹或剥落区的空气中的O_2发生氧化反应, 形成富Ta元素的氧化膜层, 如图5中b所示。富Ta氧化膜层明显降低了合金中Al元素扩散速度, 所以在富含Ta元素的氧化膜层下方区域出现了Al元素的富集区, 形成Al_2O_3内氧化物, 如图5中c和g所示。但元素Cr在高温条件下容易沿晶界发生短路扩散[15], 所以在富含Ta元素氧化膜层的上方存在Cr元素的富集, 如图5中e所示。

随着氧化进行, 合金表面进一步生成NiO、CoO、Ta_2O_5等氧化物, 这些氧化物可以与Al_2O_3和Cr_2O_3发生固相反应生成复合氧化物(Ni, Co)Cr_2O_4、$CoTa_2O_6$等[16]。复合氧化物对合金具有保护作用, 阻碍空气中的O_2向基体表面扩散。由于实验过程中, 合金反复从炉中取出, 受冷热交替和氧化物热膨胀系数不同的共同作用, 造成氧化物膜剥落, 氧化动力学曲线呈失重特征。在氧化膜剥落区域内, 合金表面继续发生Al和Cr元素的选择性氧化, 合金增重, 则氧化动力学曲线重复增重、失重的波浪式变化。随氧化温度升高, 氧化动力学曲线的质量变化往复过程变得更加明显, 氧化动力学曲线失重和增重的幅度加剧。

3.2 合金内氧化和内氮化分析

Al_2O_3和Cr_2O_3的吉布斯自由能分别为:

$$\Delta G_{Al_2O_3} = \Delta G^0_{Al_2O_3} - RT\ln p_{O_2}$$

$$\Delta G_{Cr_2O_3} = \Delta G^0_{Cr_2O_3} - RT\ln p_{O_2}$$

式中 $\Delta G^0_{Cr_2O_3}$、$\Delta G^0_{Al_2O_3}$ 分别为Al_2O_3和Cr_2O_3的标准吉布斯自由能变化值, p_{O_2} 为氧分压[17]。在富Ta氧化膜层下方贫Ta区域, 由于富Ta层阻碍了元素Al向合金表面扩散但元素Cr可发生短路扩散通过富Ta层, 导致富Ta层下方元素Al的含量相对元素Cr的含量大幅上升, 从动力学理论分析这利于元素Al发生氧化; 同时随着O_2不断向基体内部扩散, 合金内部 p_{O_2} 降低, 热力学理论分析 $\Delta G^0_{Al_2O_3}$ 和 $\Delta G^0_{Cr_2O_3}$ 在式中的作用大于 $RT\ln p_{O_2}$, 导致 $\Delta G_{Cr_2O_3} > \Delta G_{Al_2O_3}$, 因此可发生Al的选择性氧化, 形成$Al_2O_3$内氧化物。当 $\Delta G^0_{Al_2O_3} = RT\ln p_{O_2}$, 即 $\Delta G_{Al_2O_3} = 0$时, 内氧化结束, 内氧化层达最深, 此时, 合金在内氧化区域以形成Al_2O_3为主, 如图4和图5所示。

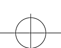
在合金基体内部, 进入合金内部空气中含有O_2和N_2, 热力学理论分析O_2和N_2都可以与元素Al发生反应生成内氧化物Al_2O_3和内氮化物AlN。合金内部生成内氧化物Al_2O_3和内氮化物AlN在合金内部的分布规律与其生成物的稳定性有关, Al_2O_3的热力学稳定性优于AlN(见表1)。进入合金内部的空气中O元素活性较高, 可优先与Al反应生成Al_2O_3, 随空气在合金中扩散的深度增加, O_2生成Al_2O_3被消耗导致O_2分压降低, 而N_2分压则相对升高, 从而利于在合金基体内部深层区域生成AlN, 因此在合金内部形成内氧化物Al_2O_3在内氮化物AlN上方的分布规律。

4 结　论

1. 合金在900℃和1000℃氧化300h后, 合金氧化动力学曲线呈现氧化初期增重速度快, 氧化期间氧化动力学曲线呈波浪式变化, 随氧化时间延长氧化增重速度趋于平缓但氧化增重总体呈上升特征。

2. 合金在900℃和1000℃下空气中形成双层结构的氧化膜, 内层为Al_2O_3, 外层主要为NiO、(Ni, Co)Cr_2O_4、$CoTa_2O_6$。

3. 合金在900℃和1000℃氧化300 h均出现了明显的内氧化和内氮化现象, 且内氧化物和内氮化物呈明显层次分布, 在内氧化物Al_2O_3下方为内氮化物AlN。



参 考 文 献

1 LU Xudong, TIAN Sugui, WANG Tao, ZHU Degang, Hot corrosion behaviour of sputtered NiCrAlY nanocrystalline coating in molten sulfate at 900℃, Transactions of Materials and Heat Treatment, **34**(10), 153(2013)
(卢旭东, 田素贵, 王 涛, 朱德刚, 溅射NiCrAlY纳米晶涂层在900℃的热腐蚀行为, 材料热处理学报, **34**(10), 153(2013))

2 PARK Sijun, SEO Seongmoon, YOO Youngsoo, JEONG Hiwon, JANG Heejin, Effects of Al and Ta on the high temperature oxidation of Ni-based superalloys, Corrosion Science, **90**, 205(2015)

3 J. Brennemana, J. Weib, Z. Sunb, L. Liub, G. Zoub, Y. Zhou. Oxidation behavior of GTD111 Ni-based superalloy at 900℃ in air, Corrosion Science, **100**, 267(2015)

4 WU Mingyu, CHEN Minghui, ZHU Shenglong, WANG Fuhui, Effect of sand blasting on oxidation behavior of K38G superalloy at 1000℃, Corrodion Science, **92**, 256(2015)

5 LI Yun, SHANG Haibo, GUO Jianting, YUAN Chao, YANG Hongcai, Isothermal oxidation behavior of a cast Ni- base superalloy K35, Acta Metallurgica Sinica, **39**(7), 751(2003)
(李 云, 尚海波, 郭建亭, 袁 超, 杨洪才, 镍基铸造高温合金K35的高温氧化行为, 金属学报, **39**(7), 751(2003))

6 SUN Chaoyang, CHEN Guicai, WU Chuanbiao, Xu Wenliang, MA Tianjun, YANG Jing, High temperature oxidation behavior of typical nickelbased superalloys, Corrosion Science and Protection Technology, **26**(4), 348(2014)
(孙朝阳, 陈桂才, 武传标, 徐文亮, 马天军, 杨 竞, 典型耐热镍基合金抗高温氧化行为研究, 腐蚀科学与防护技术, **26**(4), 348(2014))

7 PARK Sijun, SEO Seongmoon, YOO Youngsoo, Jeong HIwon, JANG Heejin, Effects of Al and Ta on the high temperature oxidation of Ni-based superalloys, Corrosion Science, **90**, 312(2015)

8 L. Huang, X. G. Sun, H. R. Guan, Z. Q. Hu, Oxidation behaviour of the single crystal Ni-base superalloy DD32 in air at 900, 1000℃ and 1100℃, Oxidation Metals, **65**(5/6), 403 (2006)

9 Wallwork G. R., Hed A. Z., Some limiting factors in the use of alloys at high temperatures, Oxidation Metals, **3**(2), 180(1971)

10 LI Weiyin, LIU Hongfei, ZHAO Shuangqun, Oxidation behavior of a newNi-based superalloy at 950℃, Transactions of Material and Treatment, **29**(30), 28(2008)
(李伟银, 刘红飞, 赵双群, 新型镍基高温合金950℃氧化行为的研究, 材料热处理学报, **29**(30), 28(2008))

11 LIANG Yingjiao, CHE Yinchang, *The Handbook of Abio-compound Thermodynamics Data*, (Shenyang, Northeast University Press, 1993)p. 449
(梁英教, 车荫昌, *无机热力学数据手册* (沈阳, 东北大学出版社, 1993))p. 449

12 Y. Z. Liu, X. B. Hu, S. J. Geng, Y. L. Zhu, H. Wei, X. L. Ma, Microstructural evolution of the interface between NiCrAlY coating and superalloy during isothermal oxidation, Materials and Design, **80**, 65(2015)

13 LI Meishuan, *High Temperature Oxidation of Metals, the First Edition* (Beijing, Metallurgy Industry Press, 2001) p.162
(李美栓, *金属的高温腐蚀*, 第一版 (北京, 冶金工业出版社, 2001)) p.162

14 LIU Tao, DONG Jiashen, LI Hui, LI Zhijun, ZHOU Xingtai, LOU Langhong, Oxidation behavior of GH3535 superalloy at 700℃ and 800℃, Chinese Journal of Materials Research, **28**(12), 895 (2014)
(刘 涛, 董加胜, 李 辉, 李志军, 周兴泰, 楼琅洪, GH3535合金在700℃和900℃的氧化行为, 材料研究学报, **28**(12), 895(2014))

15 LU Xudong, TIAN Sugui, CHEN Tao, GUO Cean, LI Guangrui, Internal oxidation and internal sulfuration of Ni-base alloy with high Cr content during hot corrosion in molten sulfate, Rare Metal Materials and Engineerring, **43**(1), 81(2014)
(卢旭东, 田素贵, 陈 涛, 郭策安, 李光瑞, 高铬镍基合金熔融硫酸盐热腐蚀过程中内氧化和内硫化行为的研究, 稀有金属材料与工程, **43**(1), 81(2014))

16 WU Mingyu, CHEN Minghui, ZHU Shenglong, WANG Fuhui, Effect of sand blasting on oxidation behavior of K38G superalloy at 1000℃, Corrosion Science, **92**, 259(2015)

17 L. Huang, X. F. Sun, H. R. Guan, Z. Q. Hu, Oxidation behavior of the directionally solidified Ni-base superalloy DS951 in air, Oxidation Metals, **64**(5/6), 303(2005)